

МОДЕЛЮВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ ПРОЦЕСІВ НАГРІВАННЯ ТА ВИПАРОВУВАННЯ В ЛАМІНАРНИХ СТІКАЮЧИХ ПЛІВКАХ РІДИНИ

Теоретично досліджено процес нагрівання ламінарної гравітаційно стікаючої догрітій до температури насичення плівки рідини. Найдано розв'язок рівняння теплопровідності з конвективним членом для періоду вирівнювання температурного профілю з моменту початку випаровування з вільної поверхні до стаціонарного режиму теплопередачі.

Ключові слова: плівка рідини, температурний профіль, випаровування.

Теплообмін між стінками та нагрітими до температури насичення плівками рідини може здійснюватися в різних як поверхневому кипінні, так і випаровуванні з вільної поверхні при слабкій дії зовнішніх факторів на режим руху плівки.

Якщо рідина в'язка, а щільність зрощення незначна, режим руху плівки наближений до ламінарного, а ефективна теплопровідність близька до молекулярної. У цьому випадку температурне поле з певним наближенням може бути отримане із рівняння перенесення тепла конвекцією та теплопровідністю.

Нехай плівка чистої догрітої до температури кипіння рідини ламінарно стікає по вертикальній поверхні і знаходиться у тепловій рівновазі з поверхнею теплообміну та паром над її поверхнею (термостатована система). На певній відстані від входу температура стінки різко зростає і починається процес нагрівання. Як тільки температурна хвиля досягне іншого кінця плівки, на її поверхні починається процес випаровування і температура зовнішнього кінця замикається постійною.

Температурне поле в плівці, можна отримати з рівняння перенесення тепла:

$$u_x \frac{\partial t(x, y)}{\partial x} = a \frac{\partial^2 t(x, y)}{\partial y^2}, \quad (1)$$

де a — теплопровідність; y — нормальна до поверхні теплообміну координата; x — позадозвня координата у напрямку руху плівки; u_x — швидкість рідини в перерізі плівки.

Швидкість усталеної вільно стікаючої в ламінарному режимі руху безхвилювої плівки при відсутності міжфазного тертя має форму параболі

$$u_x = \frac{\rho g \delta}{\mu} y - \frac{\rho g}{2\mu} y^2, \quad (2)$$

де $\delta = \sqrt{\frac{8\Gamma \mu}{\rho g}}$ — товщина плівки; Γ — об'ємна щільність

зрощення; ρ — густина; μ — динамічна в'язкість; g — прискорення вільного падіння.

При нагріванні температура пристіної частини плівки перевищує середнє значення, а в'язкість навпаки. Тому реальний розподіл швидкості відрізняється від параболічного і має більш заповнений профіль.

Якщо для спрощення швидкість u_x замінити на постійну середню

It is theoretically investigated process of heating of a laminar flowing down film of a liquid. The decision of the equation of heat conductivity with convection member for the period of alignment of a temperature profile from the moment of the beginning of evaporation from a free surface to a stationary mode of a heat transfer is presented.

Key words: film of a liquid, temperature profile, evaporation.

$$u = \frac{\rho g \delta^2}{3\mu}, \quad (3)$$

рівняння (1) перетворюється в звичайне рівняння теплопровідності методом розв'язку якого добре відомі.

Якщо стінка має малу товщину, а нагрівання здійснюється водяною парою, з певним спрощенням приходимо до граничних умов першого роду

$$t(y, 0) = t_s; \quad t(0, x) = t_s; \quad \frac{\partial t(x, y)}{\partial y} = 0, \quad (4)$$

де t_s — температура плівки на вході ділянки нагрівання; t_s — температура стінки.

За даних граничних умов розв'язок (1) має вигляд:

$$t(x, y) = t_s - (t_s - t_s) \operatorname{erfc} \left(\frac{y}{2\sqrt{\frac{a}{u} x}} \right), \quad (5)$$

де $\operatorname{erfc}(y) = 1 - \operatorname{erf}(y) = \frac{2}{\pi} \int_y^\infty e^{-\tau^2} d\tau$ — функція помилок

Гаусса.

Температурний профіль (5) розвивається до того моменту, поки температурна хвиля не досягне міжфазної поверхні плівки. З моменту появи температурного градієнта і, відповідно, теплового потоку на зовнішній границі плівки на відстані $x = x_0$ характер розвитку температурного поля змінюється, оскільки температура зовнішнього кінця плівки в результаті випаровування рідини залишається постійною.

На відстані $x = x_0$ розподіл температур відповідає профілю

$$t(x_0, y) = t_s + (t_s - t_s) \operatorname{erfc} \left(\frac{y}{2\sqrt{\frac{a}{u} x_0}} \right), \quad (6)$$

Очевидно, при $x \rightarrow \infty$ для плоскої плівки профіль температури матиме лінійний характер відповідно до умов стаціонарної теплопровідності

$$t(x, y) = t_s - (t_s - t_s) \frac{y}{\delta}, \quad (7)$$

Тепловий потік на мінераліфікованій поверхні зростає від 0 до максимального значення, $q_{\max} = \frac{\lambda}{\delta}(t_c - t_a)$, коли матимемо лінійну функцію розподілу температури (7).

Визначені співвідношення з граничними умовами для розв'язку рівняння (1) при $x > x_0$, маючи на увазі, що температура стінки і температуразовнішньої границі пилви залишаються постійними і дорівнюють відповідно t_c при $y = 0$ та t_a при $y = \delta$.

Розв'язок (1) з початковим розподілом температури (6) можна надати сумою двох функцій

$$t(x, y) = t(x, y)_p + \varphi(x, y), \quad (8)$$

де $t(x, y)_p = t(x, y) = t_c - (t_c - t_a) \frac{y}{\delta}$ — граничне (асимптотичне) значення розвитку профілю температури при $x \rightarrow \infty$, якому відповідає лінійний профіль (7); $\varphi(x, y)$ — відхилення від стаціонарного стану.

Відповідно, граничні умови задаємо у вигляді

$$\varphi(x, y) = (t_c - t_a) \left\{ \frac{y}{\delta} - \operatorname{erf} \left(\frac{y}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} \right) \right\}, \quad \text{при } x = x_0; \quad (9)$$

$$\varphi(x, 0) = 0; \quad \varphi(x, \delta) = 0.$$

В такій формі отримуємо задачу теплопроводності при «0» значеннях функції на кінцях та початковим розподілом температури $\varphi(x, y)$ (9).

Розв'язок (1, 9) можна надати у вигляді ряду

$$\varphi(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin \left(\frac{n\pi}{\delta} y \right) \exp \left(-\frac{n^2 \pi^2}{u} x \right). \quad (10)$$

а невідомі коефіцієнти C_n визначаються із початкового профілю температури на відстані $x = x_0$.

$$C_n = \frac{2}{\delta} \int_0^{\delta} \varphi(x_0, y) \sin \left(\frac{n\pi}{\delta} y \right) dy. \quad (11)$$

У явному вигляді інтеграл (11) не існує, тому для отримання коефіцієнтів C_n функцію (9) $\varphi(x, y)$ можна розкласти в ряд та проінтегрувати почленно.

$$\text{Для малих значень аргумента } z = \frac{y}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} \text{ маємо}$$

$$\frac{\sqrt{\pi}}{2} \operatorname{erf}(z) = \frac{z}{1} - \frac{z^3}{118} + \frac{z^5}{245} - \frac{z^7}{317} + \frac{z^9}{419} - \dots$$

Для функцій $\varphi(x, y)$ члени ряду мають вигляд

$$\varphi(x, y) = \frac{E}{2(t_c - t_a)} = \frac{z}{\delta} - \frac{z^3}{2\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} + \frac{z^5}{2\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} - \frac{z^7}{2\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} + \frac{z^9}{2\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} - \dots \quad (12)$$

Підставляючи (12) в (11) отримаємо коефіцієнти ряду (11) при $n = 1, 2, 3, \dots$

$$C_1 = \frac{2(t_c - t_a)}{\delta} \left[\frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} \left(\frac{y}{\delta} - \frac{y^3}{2\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} + \frac{y^5}{2\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} - \frac{y^7}{2\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} + \frac{y^9}{2\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} - \dots \right) \sin \left(\frac{\pi y}{\delta} \right) dy \right]$$

$$C_2 = \frac{2(t_c - t_a)}{\delta} \left[\frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} \left(\frac{y}{\delta} - \frac{y^3}{2\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} + \frac{y^5}{2\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} - \frac{y^7}{2\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} + \frac{y^9}{2\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} - \dots \right) \sin \left(\frac{2\pi y}{\delta} \right) dy \right]$$

$$C_3 = \frac{2(t_c - t_a)}{\delta} \left[\frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} \left(\frac{y}{\delta} - \frac{y^3}{2\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} + \frac{y^5}{2\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} - \frac{y^7}{2\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} + \frac{y^9}{2\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} - \dots \right) \sin \left(\frac{3\pi y}{\delta} \right) dy \right]$$

Почленно інтегрування знаходимо перші 10 коефіцієнтів члену ряду $C_1, C_2, \dots, C_{10}$.

$$\frac{C_1}{t_c - t_a} = \frac{2}{\pi} - \frac{2}{\pi^3} \frac{\delta}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} - 0,011738 \frac{\delta^3}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^3} - 0,0004613 \frac{\delta^5}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^5}$$

$$\frac{C_2}{t_c - t_a} = -\frac{1}{\pi} + \frac{1}{\pi^3} \frac{\delta}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} - 0,012691 \frac{\delta^3}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^3} + 0,0036462 \frac{\delta^5}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^5}$$

$$\frac{C_3}{t_c - t_a} = \frac{2}{3\pi} - \frac{2}{3\pi^3} \frac{\delta}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} + 0,008308 \frac{\delta^3}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^3} - 0,00059118 \frac{\delta^5}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^5}$$

$$\frac{C_4}{t_c - t_a} = -\frac{1}{2\pi} + \frac{1}{2\pi^3} \frac{\delta}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} - 0,0071984 \frac{\delta^3}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^3} + 0,0004928 \frac{\delta^5}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^5}$$

$$\frac{C_5}{t_c - t_a} = -\frac{3}{5\pi} + \frac{2}{5\pi^3} \frac{\delta}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} - 0,00584 \frac{\delta^3}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^3} + 0,00041346 \frac{\delta^5}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^5}$$

$$\frac{C_6}{t_c - t_a} = \frac{1}{3\pi} - \frac{1}{3\pi^3} \frac{\delta}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} + 0,014504 \frac{\delta^3}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^3} - 0,000358 \frac{\delta^5}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^5}$$

$$\frac{C_7}{t_c - t_a} = \frac{2}{7\pi} - \frac{2}{7\pi^3} \frac{\delta}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} + 0,0042227 \frac{\delta^3}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^3} - 0,0003078 \frac{\delta^5}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^5}$$

$$\frac{C_8}{t_c - t_a} = -\frac{1}{4\pi} + \frac{1}{4\pi^3} \frac{\delta}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} - 0,003078 \frac{\delta^3}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^3} + 0,0002078 \frac{\delta^5}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^5}$$

$$\frac{C_9}{t_c - t_a} = \frac{1}{5\pi} - \frac{1}{5\pi^3} \frac{\delta}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} + 0,002078 \frac{\delta^3}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^3} - 0,0001078 \frac{\delta^5}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^5}$$

$$\frac{C_{10}}{t_c - t_a} = -\frac{2}{11\pi} + \frac{2}{11\pi^3} \frac{\delta}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} - 0,001078 \frac{\delta^3}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^3} + 0,0000078 \frac{\delta^5}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^5}$$

$$\frac{C_{11}}{t_c - t_a} = \frac{1}{6\pi} - \frac{1}{6\pi^3} \frac{\delta}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} + 0,000078 \frac{\delta^3}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^3} - 0,00000078 \frac{\delta^5}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^5}$$

$$\frac{C_{12}}{t_c - t_a} = -\frac{1}{7\pi} + \frac{1}{7\pi^3} \frac{\delta}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} - 0,0000078 \frac{\delta^3}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^3} + 0,000000078 \frac{\delta^5}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^5}$$

$$\frac{C_{13}}{t_c - t_a} = \frac{1}{8\pi} - \frac{1}{8\pi^3} \frac{\delta}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} + 0,00000078 \frac{\delta^3}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^3} - 0,000000078 \frac{\delta^5}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^5}$$

$$\frac{C_{14}}{t_c - t_a} = -\frac{1}{9\pi} + \frac{1}{9\pi^3} \frac{\delta}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} - 0,000000078 \frac{\delta^3}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^3} + 0,0000000078 \frac{\delta^5}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^5}$$

$$\frac{C_{15}}{t_c - t_a} = \frac{1}{10\pi} - \frac{1}{10\pi^3} \frac{\delta}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} + 0,0000000078 \frac{\delta^3}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^3} - 0,00000000078 \frac{\delta^5}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^5}$$

$$\frac{C_{16}}{t_c - t_a} = -\frac{1}{11\pi} + \frac{1}{11\pi^3} \frac{\delta}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} - 0,0000000078 \frac{\delta^3}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^3} + 0,00000000078 \frac{\delta^5}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^5}$$

$$\frac{C_{17}}{t_c - t_a} = \frac{1}{12\pi} - \frac{1}{12\pi^3} \frac{\delta}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} + 0,00000000078 \frac{\delta^3}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^3} - 0,000000000078 \frac{\delta^5}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^5}$$

$$\frac{C_{18}}{t_c - t_a} = -\frac{1}{13\pi} + \frac{1}{13\pi^3} \frac{\delta}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} - 0,000000000078 \frac{\delta^3}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^3} + 0,0000000000078 \frac{\delta^5}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^5}$$

$$\frac{C_{19}}{t_c - t_a} = \frac{1}{14\pi} - \frac{1}{14\pi^3} \frac{\delta}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} + 0,0000000000078 \frac{\delta^3}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^3} - 0,00000000000078 \frac{\delta^5}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^5}$$

$$\frac{C_{20}}{t_c - t_a} = -\frac{1}{15\pi} + \frac{1}{15\pi^3} \frac{\delta}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} - 0,00000000000078 \frac{\delta^3}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^3} + 0,000000000000078 \frac{\delta^5}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^5}$$

$$\frac{C_{21}}{t_c - t_a} = \frac{1}{16\pi} - \frac{1}{16\pi^3} \frac{\delta}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} + 0,000000000000078 \frac{\delta^3}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^3} - 0,0000000000000078 \frac{\delta^5}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^5}$$

$$\frac{C_{22}}{t_c - t_a} = -\frac{1}{17\pi} + \frac{1}{17\pi^3} \frac{\delta}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} - 0,0000000000000078 \frac{\delta^3}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^3} + 0,00000000000000078 \frac{\delta^5}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^5}$$

$$\frac{C_{23}}{t_c - t_a} = \frac{1}{18\pi} - \frac{1}{18\pi^3} \frac{\delta}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} + 0,00000000000000078 \frac{\delta^3}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^3} - 0,000000000000000078 \frac{\delta^5}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^5}$$

$$\frac{C_{24}}{t_c - t_a} = -\frac{1}{19\pi} + \frac{1}{19\pi^3} \frac{\delta}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} - 0,000000000000000078 \frac{\delta^3}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^3} + 0,0000000000000000078 \frac{\delta^5}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^5}$$

$$\frac{C_{25}}{t_c - t_a} = \frac{1}{20\pi} - \frac{1}{20\pi^3} \frac{\delta}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} + 0,0000000000000000078 \frac{\delta^3}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^3} - 0,00000000000000000078 \frac{\delta^5}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^5}$$

$$\frac{C_{26}}{t_c - t_a} = -\frac{1}{21\pi} + \frac{1}{21\pi^3} \frac{\delta}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} - 0,00000000000000000078 \frac{\delta^3}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^3} + 0,000000000000000000078 \frac{\delta^5}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^5}$$

$$\frac{C_{27}}{t_c - t_a} = \frac{1}{22\pi} - \frac{1}{22\pi^3} \frac{\delta}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} + 0,000000000000000000078 \frac{\delta^3}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^3} - 0,0000000000000000000078 \frac{\delta^5}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^5}$$

$$\frac{C_{28}}{t_c - t_a} = -\frac{1}{23\pi} + \frac{1}{23\pi^3} \frac{\delta}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0} - 0,0000000000000000000078 \frac{\delta^3}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^3} + 0,00000000000000000000078 \frac{\delta^5}{\sqrt{\frac{\pi}{u}} x_0^5}$$

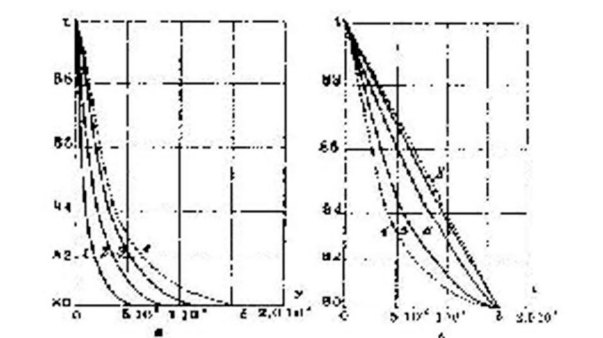


Рис. 1 Розвиток температурного поля в пористій до температур насичення пилви води на різних відстанях від входу. $Re = 300$. а — період нагрівання без випаровування з поверхні (формула (5)); б — період нагрівання з випаровуванням з поверхні (формула (8)). 1 — $x = 0,2$ мм; 2 — $0,5$; 3 — $1,2$; 4 — 2 ; 5 — 3 ; 6 — 6 ; 7 — 10 ; 8 — розрахунок по (7). $\Gamma_1 = 1,095 \cdot 10^{-3}$ м²/с; $\delta = 0,16$ мм; $\bar{u} = 0,23$ м/с; $\nu = 0,365 \cdot 10^{-4}$ м²/с

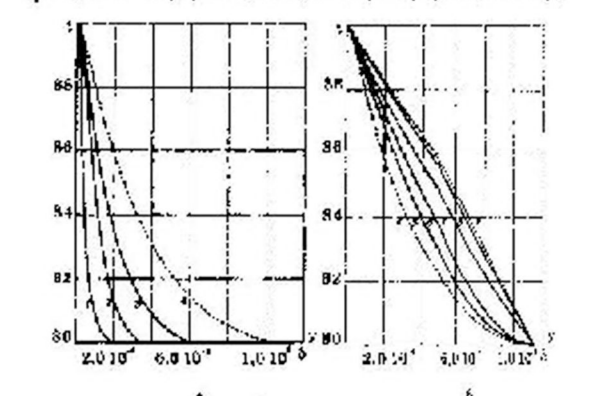


Рис. 2 Розвиток температурного поля в пористій до температур насичення пилви цукрового розчину на різних відстанях від входу. $Re = 300$. а — період нагрівання без випаровування з поверхні (формула (5)); б — період нагрівання з випаровуванням з поверхні (формула (8)). 1 — $x = 20$ мм; 2 — 100 ; 3 — 300 ; 4 — 750 ; 5 — 1000 ; 6 — 1500 ; 7 — 2500 ; 8 — 4000 ; 9 — розрахунок по (7). $\Gamma_1 = 1,245 \cdot 10^{-3}$ м²/с; $\delta = 1,16$ мм; $\bar{u} = 1,06$ м/с; $\nu = 4,15 \cdot 10^{-4}$ м²/с

$$\frac{C8}{t_c - t_s} = -\frac{1}{4\pi} - \frac{1}{4\sqrt{\pi^2}} \frac{\delta}{\sqrt{ax_s}} - 0,0037 \frac{\delta^2}{\sqrt{(ax_s)^3}} + 0,0002713 \frac{\delta^3}{\sqrt{(ax_s)^5}}$$

$$\frac{C9}{t_c - t_s} = -\frac{2}{9\pi} - \frac{2}{9\sqrt{\pi^2}} \frac{\delta}{\sqrt{ax_s}} + 0,0022 \frac{\delta^2}{\sqrt{(ax_s)^3}} - 0,0002431 \frac{\delta^3}{\sqrt{(ax_s)^5}}$$

$$\frac{C10}{t_c - t_s} = -\frac{1}{5\pi} + \frac{1}{5\sqrt{\pi^2}} \frac{\delta}{\sqrt{ax_s}} - 0,002975 \frac{\delta^2}{\sqrt{(ax_s)^3}} + 0,00022 \frac{\delta^3}{\sqrt{(ax_s)^5}}$$

Для ілюстрації отримання результатів розглянемо процес нагрівання та випаровування стікаючої ламінарної, нагрітої до стану насичення плівки води та в'язкого цукрового розчину з концентрацією сухих речовин 60 % з температурою 80 (система під вакуумом), яка на певній відстані від входу в канал контактує зі стінкою з температурою 90 °С.

Порівняльні розрахунки виконуємо за умови

однакових чисел Рейнольдса $Re = \frac{\Gamma_s}{\nu} = 300$, що відпо-

відає ламінарному режиму руху. Оскільки в'язкість води та розчину відрізняється на порядок, то, відповідно, відрізняються і щільності зрешення в 12 разів, а товщина плівки в 7,25.

Висновки:

1. Виконано розв'язок двовірного диференціального рівняння теплопровідності з конвективним членом для крайової задачі (4).

2. Отримано співвідношення для розрахунку температурного поля стікаючої плівки рідини, що нагрівається при постійній температурі стінки від сталу кінченню до усталеного температурного профілю в режимі випаровування з вільної поверхні.

Надійшла до редакції 20.03.2019 р.